冰冻圈水文学：解密地球最大淡水库

丁永建[1,2,3*]　张世强[4,5]　陈仁升[2]

1 中国科学院西北生态环境资源研究院 冰冻圈科学国家重点实验室 兰州 730000
2 中国科学院内陆河流域生态水文重点实验室 兰州 730000
3 中国科学院大学 北京 100049
4 陕西省地表系统与环境承载力重点实验室 西安 710127
5 西北大学 城市与环境学院 西安 710127

摘要　冰冻圈水体以固态存在，固态水融化后在流域、区域乃至全球尺度上影响水文、水资源和水循环。文章从水文学视角，重点从冰冻圈水文功能、融水径流过程及其影响、冰冻圈水文生态与环境效应等方面介绍冰冻圈水文研究的内容和最新进展。冰冻圈水文功能主要表现在水源涵养、径流补给、水资源调节3个方面。在气候变暖的背景下，冰冻圈水文过程已经发生了显著变化，冰川消融期提前，冰川融水径流增多；融雪期提前，多年冻土退化导致冬季径流增加，对流域径流的年内调节能力增加。预估未来气候变化情景下，冰川融水持续减少，其变化对我国西北地区的水资源管理带来更大挑战。冰冻圈水文过程变化也对寒区生态系统和生态工程、洪水灾害及可持续发展、乃至地缘政治有重要影响。

关键词　冰冻圈，冰冻圈水文，水文作用，变化，影响

DOI　10.16418/j.issn.1000-3045.20200302002

全球淡水资源的70%以上储存在冰川、冰盖中，北半球积雪年最大水当量约为3×10^6 km^3，因此，冰冻圈是世界上最大的淡水资源库。冰冻圈与水圈相互作用是气候系统乃至地球系统中的重要水文过程，包括由冰冻圈诸要素（如冰川、冰盖、积雪、冻土、河冰、湖冰和海冰等）中释放出来的液态水及其水文、水资源、生态和环境效应，不仅是人们关注的重点和热点，也是冰冻圈水文学研究的主要内容。冰冻圈水文学是顺应国际冰冻圈科学发展趋势、为满足区域水资源可持续利用实际需要而发展起来的新兴学科。

传统上对冰冻圈不同要素的水文研究主要是针对

*通讯作者
资助项目：国家自然科学基金（41730751、41671056）
修改稿收到日期：2020年3月24日

单个要素分别开展的，例如，冰川水文，主要从冰川的消融、径流形成以及冰川径流在流域中所起的作用等方面开展研究，冻土水文、积雪水文等也与此类似[1]。随着全球气候变化对冰冻圈的影响越来越显著，冰冻圈诸要素的水文过程及影响受到广泛关注。由于冰冻圈诸要素在流域尺度上往往是共同作用，与冰冻圈相关的水问题已经不能从传统单一冰冻圈要素的角度去理解其过程和影响，而需要从冰冻圈科学的视角审视冰冻圈的水问题。例如，在冰冻圈分布的流域内往往不仅有冰川、积雪，也有多年和季节冻土，加上降雨，水文过程十分复杂。如果要了解一个流域内的水文情况，只了解冰川或积雪或冻土单一水文影响是不够的，需要将冰冻圈各个要素的水文过程统一考虑，同时与降雨水文一起考虑，才能准确认识流域水文过程以及不同冰冻圈要素所起的水文作用。冰冻圈不同水文要素整体观是冰冻圈水文学的核心思想。

1 冰冻圈水文学

简单而言，冰冻圈水文学是研究冰冻圈诸要素水文过程和机理，以及其水文作用和影响的学科。冰冻圈水文学是随着冰冻圈科学的发展而被提出的，是一门新兴的、具有特殊水文属性的学科，也是由中国科学家首先提出并完成其学科体系构建的科学[2]。目前，国际上有关冰冻圈水文学（cryo-hydrology 或 cryospheric hydrology）的研究较少，在仅有的一些文献只是用到了“冰冻圈水文学”这一词语[3-6]，并没有涉及到学科本身的科学内涵。

冰冻圈水文主要特点是水以固态形式储存，以液态形式释放。冰-水相互转化过程及其对资源和环境的影响是冰冻圈水文学关注的焦点。冰冻圈水文学研究包含 2 个方面的研究内容：① 研究冰冻圈诸要素自身的水文机理和变化过程；② 研究冰冻圈变化在流域、区域及全球水文过程和水循环中所产生的影响，如冰川变化对河流径流影响可涉及整个流域水资源问题，而冰冻圈变化对海平面的影响就涉及到全球水循环问题。

在气候变暖的背景下，全球冰冻圈发生了很大变化，主要表现在冰川退缩、积雪减少、多年冻土退化、海冰范围消退等，以及冰冻圈自身温度的升高进而导致其不稳定性的增加[7]。冰冻圈变化对水文过程产生了明显影响，进而会对水资源、生态和灾害等过程产生重要影响。可见尽管冰冻圈分布在人迹罕至的高海拔、高纬度地区，但其水文影响却波及下游和中、低纬度整个流域和广泛领域。有关冰川融水对水资源影响的研究表明，来自遥远冰冻圈的水对未来水资源影响的风险巨大，冰冻圈水资源与人类可持续发展息息相关[8-13]。文章主要从冰冻圈水文学的视角，简要介绍冰冻圈水文的作用和影响。

2 冰冻圈的基本水文功能

冰冻圈的水文功能主要表现在 3 个方面：水源涵养、径流补给、水资源调节。

*（1）水源涵养功能主要表现在水源发源地和冷湿岛效应 2 个方面。*① 冰冻圈发育于高海拔、高纬度地区，是世界上众多大江大河的发源地。以青藏高原为主体的冰冻圈，是长江、黄河、塔里木河、怒江、澜沧江、伊犁河、额尔齐斯河、雅鲁藏布江、印度河、恒河等著名河流的源区（图 1），也是“亚洲水塔”所在。冰冻圈作为水源地不同于降雨型源地，是以固态水转化为液态水的方式形成水源，释放的是过去积累的水量；即使在干旱少雨时期，冰冻圈仍然会源源不断输出水量，其水源的枯竭需要经历较大和长周期气候波动。② 山地冰冻圈所在的高大山系，能够直接拦截由于地形抬升而沿山坡上升的水汽，以及沿主风向运动的水汽。由于冰冻圈是一个巨大的冷源，可以有效凝结这些水汽形成降水。特别是在干旱内陆河流域，冰冻圈在拦蓄外源水汽的同时，还通过流域的内循环将内部水汽输聚到高冷的冰冻圈地区。正因为

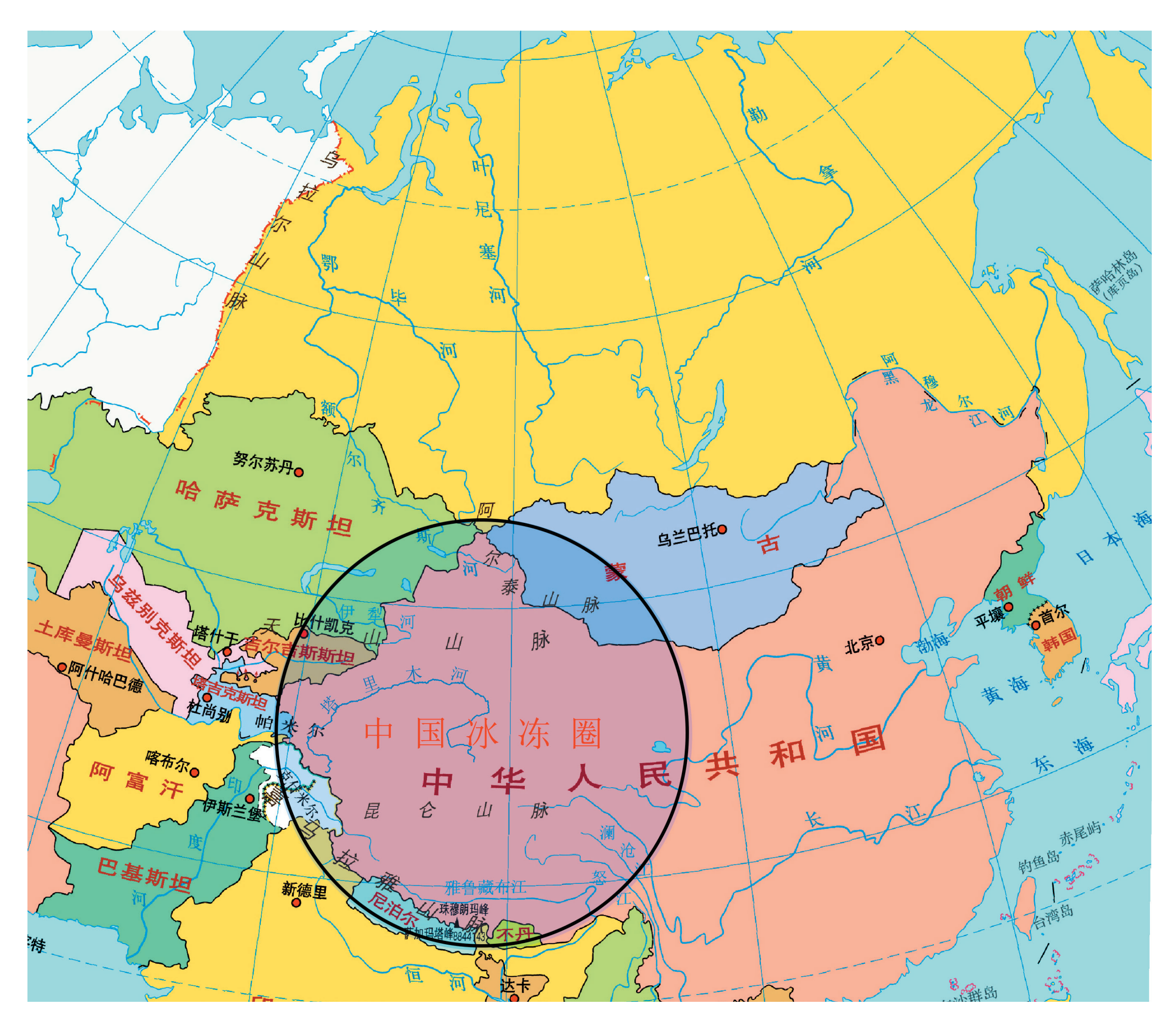


图1　中国西部冰冻圈是亚洲众多河流的发源地

如此，干旱内陆河流域平原区与冰冻圈区降水量可相差5—10倍。

（2）冰冻圈被人们广泛认知的水文作用是径流补给功能。作为固态水体，冰冻圈自身就是重要的水资源，其资源属性表现在总储量和年补给量2个方面，冰冻圈对河流的年补给量是地表径流的重要组成部分。2010年中国冰川年融水量约为7.8×10^{10} m^3，超过黄河入海的年总水量（6×10^{10} m^3）。全国冰川径流量约为全国河川径流量的2.2%左右，相当于我国西部甘肃、青海、新疆和西藏4省（自治区）河川径流量的10.5%。

（3）相较于冰冻圈的水源涵养和径流补给功能，冰冻圈的水资源调节功能更为重要。在无冰川分布的流域，河流主要依靠降水补给，径流年际变化很大，表明径流过程很不“稳定”。但在有冰冻圈覆盖的流域，丰水年由于流域降水偏多，分布在极高山区的冰川区气温往往偏低，冰川消融量减少，冰川融水对河流的补给量下降，削弱降水偏多而引起的流域径流增加幅度；反之，当流域降水偏少时，冰川区相对偏高的温度导致冰川融水增加，弥补降水不足对河流的补给量[1]。这样，由于冰川的存在，将使有冰川的流域河流径流处于相对稳定的状态，表明了冰川作为固体

水库以“削峰填谷”的形式表现出显著的调节径流丰枯变化的作用，这对于旱区绿洲水资源利用是十分有利的。冻土水文的调节作用主要表现在多年冻土消融可使活动层厚度增加（图2），土壤储水空间增大，夏季降水通过土壤活动层释放的水量增多，结果是夏季降水在活动层中延长了产流时间，往往导致多年冻土区冬季径流增加[1,14,15]。

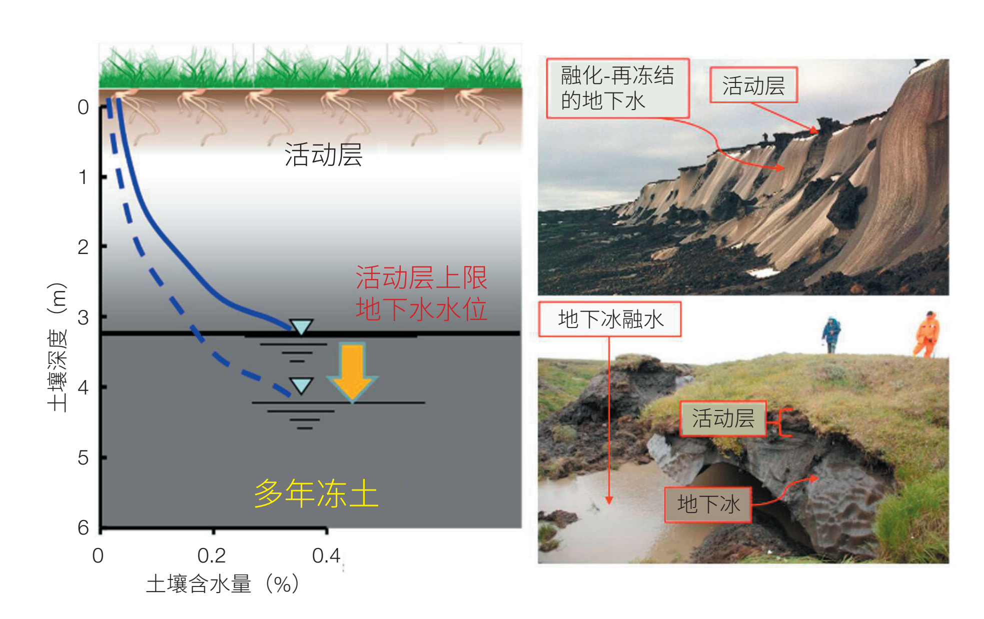


图2　多年冻土变化对径流的影响示意图

左侧的蓝色实线和虚线分别表示多年冻土活动层上限和地下水水位随着冻土融化下降前、后位置

3 冰冻圈径流变化及影响

冰冻圈变化已经导致冰川融水径流普遍增加、融雪径流提前、多年冻土区冬季径流增加，这是20世纪60年代以来冰冻圈融水径流变化的基本特点。

3.1 冰川融水对径流的影响

全球变暖导致受冰川补给影响较大的河流径流增加，对地表水资源产生显著影响，这种影响在干旱缺水的地区尤为突出。以中国为例，1980年以来，新疆出山径流增加显著，最高增幅可达40%。乌鲁木齐河源区径流增加的70%来自于冰川加速消融补给，南疆阿克苏河近十几年径流增加的1/3左右来源于冰川径流增加；长江源区近40年河川径流减少14%，而冰川径流则增加了15.2%。如果没有冰川径流的补给，河川径流减少将更加显著。这些冰川消融导致的江河水量增加在目前总体上是有利的[16,17]。

随着冰川面积减小，冰川融水量必然会在某一时间段出现减少，冰川融水由增到减的拐点是人们关注的焦点。研究表明，冰川径流随气温升高总体呈现“先增后减”的趋势。冰川融水“先增后减”拐点的出现时间，主要与流域冰川的大小及多少有关：① 冰川覆盖率低、以小冰川为主的流域，其冰川融水“先增后减”的拐点已经出现，如受东亚季风影响较大的河西走廊石羊河流域[18]、西风带天山北坡的玛纳斯河和呼图壁河流域，以及青藏高原的怒江源、黄河源和澜沧江源[19,20]；② 以较大冰川为主的流域在未来10—20年会出现冰川融水拐点，如天山南坡的库车河和木扎特河、祁连山黑河和疏勒河，以及青藏高原的长江源等[19,20]；③ 具有大型冰川的流域，冰川融水拐点出现较晚或在21世纪末不会出现，例如，天山南坡的阿克苏河流域，融水拐点可能出现在2050年以后（图3）。从冰川融水的季节分配来看，冰川开始消融日期提前，结束消融日期推后。

3.2 积雪变化的水文效应

1965—2015年，欧亚大陆实测积雪变化整体呈增“暖”、增厚、增强趋势，表现在积雪首日推迟、终日提前、积雪期减少，平均积雪深度明显增加，90%台站降雪强度增加；小雪减少，中雪2000年前缓慢增加、2000年后减少，大雪整体增加，暴雪1990年前减少、1990年后增加[21]。

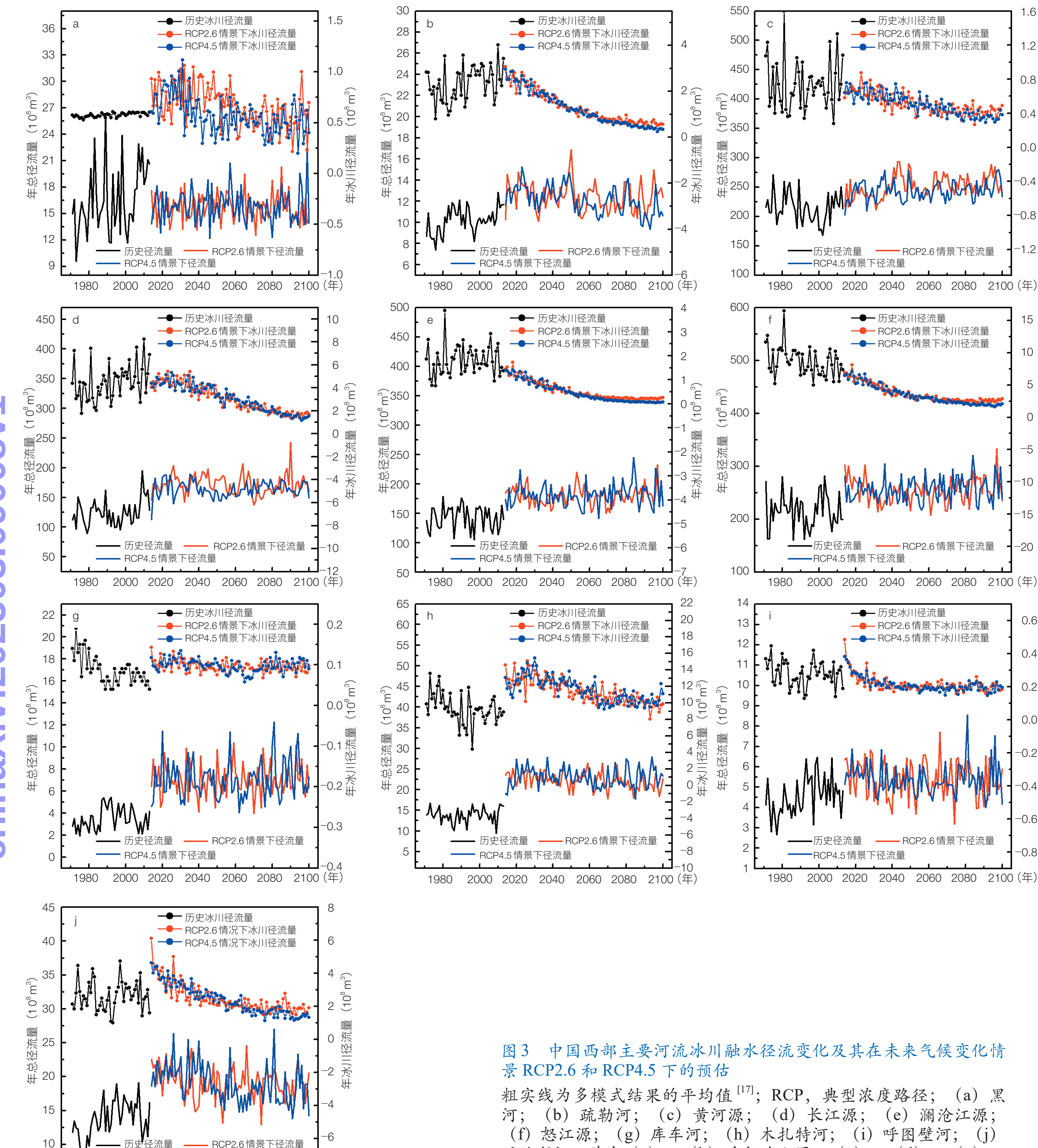


图 3　中国西部主要河流冰川融水径流变化及其在未来气候变化情景 RCP2.6 和 RCP4.5 下的预估

粗实线为多模式结果的平均值[17]；RCP，典型浓度路径；（a）黑河；（b）疏勒河；（c）黄河源；（d）长江源；（e）澜沧江源；（f）怒江源；（g）库车河；（h）木扎特河；（i）呼图壁河；（j）玛纳斯河；其中（a）、（b）为祁连山区，（c）、（d）、（e）、（f）为青藏高原腹地，（g）、（h）、（i）、（j）为天山山区

中国西部流域降雪/积雪融水比例一般为15%—25%，是北方广大地区主要水源。气候变暖、降雪和降雨比例（雨雪比）以及积雪量变化改变了流域的年内径流过程，导致融雪提前、消融期缩短，尤其是以积雪融水补给为主的部分河流受影响较大，例如克兰河最大径流月由每年6月提前到5月（图4）。1960年以来，北半球高海拔和高纬度流域融雪径流呈现增加趋势，其他地区主要为减少趋势（表1）。1960—2014年，中国融雪径流总体呈现增加趋势，天山南段、祁连山西段、长江源区及长白山区融雪径流增加明显；未来中国西部融雪径流总体呈现变化不大或增加趋势，高海拔区的温升尚不足以引起雨雪比发生质的变化，降水增加造成的高山区降雪量增加是主要原因[16]。随着中国西部冰川面积萎缩，冰川融水径流减少，融雪径流则对西部、尤其是西北地区的作用更显重要。

表1 1960年以来北半球主要河流融雪径流变化[17]

流域	融雪径流趋势	显著与否
科罗拉多河	减少	显著
莱茵河	减少	显著
鄂毕河	增加	显著
叶尼塞河	增加	显著
勒拿河	增加	显著
锡尔河	减少	不显著
阿姆河	减少	不显著
印度河	减少	显著
印度河源	减少	不显著
塔里木河	减少	不显著
黑龙江	减少	不显著
长江源	增加	不显著
黄河源	减少	不显著
雅鲁藏布江	增加	不显著
湄公河	增加	不显著
恒河	减少	不显著

说明：显著性置信水平为0.05

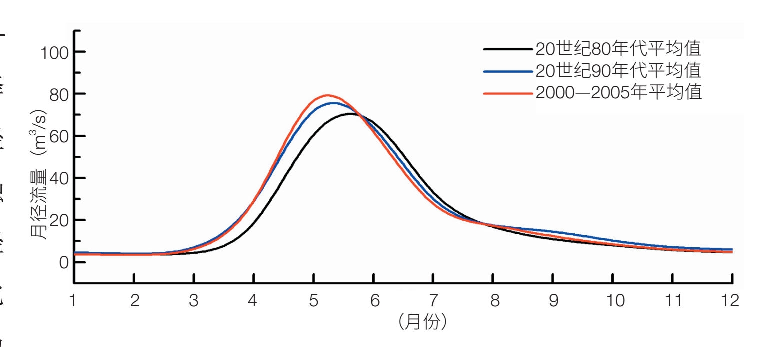


图4 新疆克兰河阿勒泰水文站融雪径流年内变化

3.3 冻土水文效应

冻土冻融过程对水文的影响是多方面的。土壤冻结可以增加径流，阻滞土壤水补给，增加积雪春季径流，以及延滞溶质向土壤深层输移。由于积雪与冻土关系密切，两者的水文相互关系也是被高度关注的问题。由于水的相变，融雪下渗过程受到许多因素影响，包括土壤温度、冻结深度、前期土壤含水量、积雪厚度，以及这些因素之间复杂的相互作用。小尺度的过程研究表明，由于土壤中孔隙冰的存在，通常会降低土壤的下渗能力，形成较大的地表融雪径流并减少地下水的补给。

多年冻土的存在主要影响地表产汇流过程。多年冻土覆盖率不同的流域，其年内径流过程（即年内径流分配）有显著差异[13,21,22]；冻土年代际变化对径流的影响主要出现在多年冻土覆盖率高的流域，多年冻土退化导致下垫面和储水条件的变化，进而导致冬季径流增加（图2）。俄罗斯境内径流变化的分析和模拟表明，由于冻土冻结锋面下降及融化过程的改变，导致俄罗斯欧洲部分地表冬季径流显著增加，径流增加量高达50%—120%[23]。例如，流入北极地区的4条主要河流（Lena、Yenisei、Ob、Mackenzie），冬春季径流增加显著，而夏季径流减少，这与冻土融化和春季积雪消融提前有密切关系[23]。

多年冻土及季节冻土退化已经引起中国相应地区河流冬季（枯水期）径流增加，夏季径流减少，以及年内径流过程变缓。径流变化的强度与流域多年冻土

覆盖率有关。未来随着全球变暖，冻土持续退化，植被下垫面改变，可能会导致寒区流域径流系统变小。气候变暖可导致高海拔冻土高寒草原和灌丛草甸扩张；而沼泽草甸和高寒草甸退化，导致降水更多消耗于下垫面扩张引起的蒸散发量增加；区域的蒸散发量占降水量的比例增加会导致寒区流域未来的产流系数变小[16]。

4 冰冻圈水文的生态与环境效应

4.1 冰冻圈水文过程变化与生态系统

冰冻圈水文变化不仅影响河川径流的变化，而且通过水循环的改变影响生态系统的变化。在我国干旱区内陆河流域，高山冰川—山前绿洲—尾闾湖泊构成的流域生态系统中（图5），冰川变化对绿洲萎扩和湖泊消长具有重要的调节和稳定作用。冰川是我国干旱区绿洲稳定和发展的生命之源。实际上正是由于冰川和积雪的存在，才使得我国深居内陆腹地的干旱区形成了许多人类赖以生存的绿洲，也使得我国干旱区有别于世界上其他地带性干旱区。这种冰川积雪—绿洲景观及其相关的水文和生态系统稳定和持续存在的核心是冰川和积雪，没有冰川和积雪就没有绿洲，也就没有千百年来在那里生息的人民。

在高纬度及高海拔地区，冰冻圈变化除直接影响一些大江大河源区的水文情势外，还与湖泊消长、沼泽湿地变化有密切联系。冰川变化影响周围地区的水循环过程，进而又影响到源区生态与环境。多年冻土活动层特殊的水热交换是维持高寒生态系统稳定的关键所在，冻土区的高寒沼泽湿地和高寒草甸生态系统具有显著的水源涵养功能，是稳定江河源区水循环与河川径流的重要因素。冻土变化是导致江河源区高寒草甸与沼泽湿地大面积退化的主要原因。总之，在高海拔、高纬度地区，冰冻圈—河流—湖泊—湿地紧密相连，在干旱区内陆河流域，冰冻圈—河流—绿洲—尾闾湖泊—荒漠不可分割，冰冻圈变化对寒区生态系统具有牵一发而动全身的作用。中国西部生态建设与水源保护重大工程，如“三江源”国家公园、塔里木河综合治理工程、西藏生态屏障工程、祁连山生态保护工程及天山自然保护区等均与冰冻圈水文影响息息相关。

在南、北极地区，冰冻圈融化的冷、淡水对海洋生态具有显著影响。冰冻圈融化的“冷水效应”可以改变高纬度大洋的温度，而其“淡水效应”也可以改变大洋温度。在全球变暖背景下，持续的冰冻圈融水进入海洋，改变了海洋生态系统的生存环境，从而会对海洋生态系统产生影响。在陆地上高海拔流域，冰冻圈变化会对湖泊生态系统产生同样的影响。



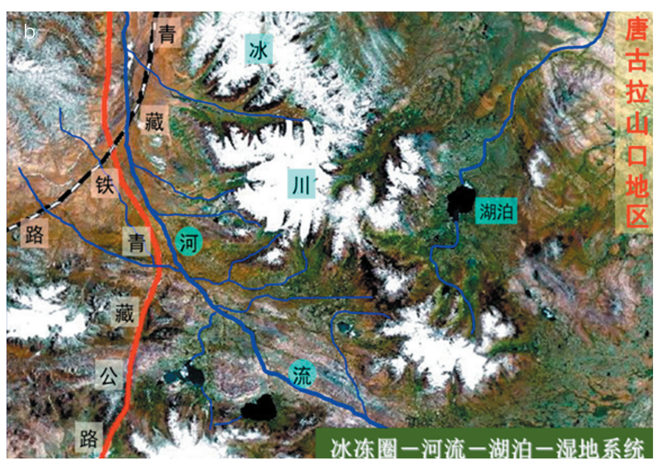


图5　内陆河流域（a）和青藏高原（b）冰冻圈-水文-生态关系

高山冰冻圈融水对流域生物地球化学过程也具有重要影响。冰冻圈作用区强烈侵蚀、风化的大量松散堆积物及冰川表面长期累积的物理、化学和生物物质随着冰川融水的搬运进入下游湖泊、农田、草地等，会影响湖泊的温度、浊度、营养物等，也会影响农田和草地的土壤成分和营养成分。实际上，在内陆河流域，绿洲农田的土壤物理、化学和生物组成与上游冰冻圈地区物质组成不无关系，绿洲土壤的生物地球化学成分重要来源之一是冰冻圈侵蚀和积累的物质在冰冻圈水文作用下输送并长期积累的结果。

4.2 冰冻圈水文灾害

冰川、积雪融水可形成洪水，影响低地人类聚集区经济、交通及生命财产安全。① 融雪型洪水。高纬度及高海拔积雪在融雪期由于冻土活动层尚无融化，前期积雪量较大，或升温较快且高，往往会形成融雪型洪水并引发灾害。融雪型洪水可分为山区型和平原型，在高海拔地区往往形成山区型洪水。例如天山、喜马拉雅山、阿尔泰山等地，是山区型融雪洪水多发区。2010 年 3 月新疆北部升温与雨雪天气反复交错，导致伊犁、阿勒泰、塔城等地融雪性洪水频发，部分地区交通屡次受阻。异常的天气变化给群众的生产生活造成很大损失，导致伊犁河谷 31 万人受灾，1 万多座温室大棚、2 万多座房屋倒塌，4 万多头牲畜死亡。而在高纬度地区，除山区型融雪洪水外，还有平原型融雪洪水，影响更加广泛，在欧洲这种情况也时有发生[23]。② 冰川消融型洪水。一般发生在消融最大的 7、8 月，在前期持续高温影响下，冰川消融加速，形成洪水。融冰型洪水由于冻土已经融化，其对泥沙搬运能力也大大增强，因此，融冰型洪水往往会形成泥石流，对下游的危害性也增大。③ 混合型洪水。融雪洪水和融冰洪水与降水洪水叠加，往往形成混合型洪水，影响更加严重。④ 冰湖溃决型洪水。具有突发、快速、能量大等特点，对下游影响更具威胁。由于其形成机制复杂、预测困难，难以预防，造成的灾害程度往往也较大。

4.3 冰冻圈水资源的地缘效应

受冰冻圈影响的跨境河流众多，如何系统认识冰冻圈变化的水文、水资源效应，不仅关系到所在国的可持续发展，而且也涉及到周边国家的水资源利用。一旦冰冻圈水资源变化出现拐点，可导致河川径流发生显著变化，将会引发国际问题。这一问题受到国际上的广泛关注，一些国际组织纷纷发出警示。例如，联合国发展署发布的《2006 年人类发展报告》中指出，中亚、南亚和青藏高原“未来 50 年冰川融化可能是对人类进步和粮食安全最严重的威胁之一”。世界银行在《2005 年世界发展指标》中也指出，未来 50 年喜马拉雅山（青藏高原）冰川变化将严重影响那里的河川径流。问题的关键是冰冻圈所在国的冰冻圈水资源对下游影响到底有多大，也就是影响的时间尺度多长、空间范围多大。这些定量影响程度的理解是十分重要的，否则会带来上、下游国家之间的一系列的猜忌误解，甚至引发国际争端。中国许多冰川融水流出境外，也有一些国外冰川融水补给中国境内河流。掌握冰冻圈水文变化的过程、量值、影响的时空尺度是争取国际“水谈判”话语权和主动权的关键。

5 结论与展望

冰冻圈水文过程的主要特点是其产汇流过程与温度密切相关，在气候变暖背景下，冰冻圈水文过程已经发生了很大变化，对“亚洲水塔”的安危已产生重要影响。文章的主要结论如下：

（1）冰冻圈的水文功能主要表现在水源涵养、径流补给、水资源调节 3 个方面，其对“亚洲水塔”的作用尤为明显。

（2）在气候变暖的背景下，冰冻圈水文过程已经发生变化，主要表现为冰川融水径流增加，冰川储量减少，融雪径流峰值提前，以及多年冻土退化导致径流年内分配发生变化。预估未来冰冻圈水资源将减

少，其调节功能也将下降。

（3）冰冻圈水文过程的未来变化对“亚洲水塔”、寒区的生态过程及可持续发展、灾害等具有重要影响。

随着冰冻圈的快速变化，冰冻圈融水也呈现加速变化之势，由此引发的冰冻圈水量补给和水文循环将出现许多潜在的后果。目前，人们对冰冻圈水文变化的认识程度大多数还停留在对冰冻圈融水量的现象描述阶段，冰冻圈水文带来的深层、系统和广泛影响还认识不够。例如，冰川融水的水源涵养和调节作用、冻土水文的水量补给和不同时间尺度的调蓄作用、大尺度冰冻圈水文循环过程及其对大洋水文、生态和环流的影响等，这些科学问题的深入理解，不仅是准确认识流域径流变化、明晰全球水循环过程的基础性问题，也是流域水资源可持续利用、区域生态科学保育、全球水文影响定量辨识的重大科学问题。因此，未来的冰冻圈水文学研究不仅需要针对冰冻圈水文基础问题，开展以观测和模拟为基本手段的机理、过程研究，而且更需要以全新的视角，以冰冻圈水文整体观的思路，以流域、区域和全球水问题实际需求为着眼的冰冻圈水文整体性、系统化研究。

参考文献

1 丁永建，张世强，陈仁升. 寒区水文导论. 北京: 科学出版社, 2017.

2 Qin D H, Ding Y J, Xiao C D, et al. Cryospheric Science: Research framework and disciplinary system. National Science Review, 2018, 5(2): 255-268.

3 Phillips T, Rajaram H, Colgan W, et al. Evaluation of cryo-hydrologic warming as an explanation for increased ice velocities in the wet snow zone, Sermeq Avannarleq, West Greenland. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2013, 118: 1241-1256.

4 Singh V P. Handbook of Applied Hydrology, 2nd Ed. New York: McGraw-Hill Education, 2016.

5 Chen R S, Song Y X, Kang E S, et al. A cryosphere-hydrology observation system in a small alpine watershed in the Qilian Mountains of China and its meteorological gradient. Arctic, Antarctic, and Alpine Research, 2014, 46(2): 505-523.

6 Woo M K. Cryohydrology in Canada: A brief history. Hydrological Processes, 2019, 33(26): 3407-3411.

7 Ding Y J, Zhang S Q, Zhao L, et al. Global warming weakening the inherent stability of glaciers and permafrost. Science Bulletin, 2019, 64: 245-253.

8 姚檀栋, 邬光剑, 徐柏青, 等. “亚洲水塔”变化与影响. 中国科学院院刊, 2019, 34(11): 1203-1209.

9 Immerzeel W W, Beek L P H V, Bierkens M F P. Climate change will affect the Asian water towers. Science, 2010, 328(5984): 1382-1385.

10 Immerzeel W W, Lutz A F, Andrade M, et al. Importance and vulnerability of the world’s water towers. Nature, 2019, 577: 364-369.

11 Biemans H, Siderius C, Lutz A, et al. Importance of snow and glacier meltwater for agriculture on the Indo-Gangetic Plain. Nature Sustainability, 2019, 2: 594-601.

12 Yao T D, Xue Y K, Chen D L, et al. Recent Third Pole’s rapid warming accompanies cryospheric melt and water cycle intensification and interactions between monsoon and environment: Multi-disciplinary approach with observation, modeling and analysis. Bulletin of the American Meteorological Society, 2019,100(3): 423-444.

13 Radić V, Hock R. Glaciers in the Earth’s hydrological Cycle: Assessments of glacier mass and runoff changes on global and regional scales. Surveys in Geophysics, 2014, 35: 813-837.

14 叶柏生, 丁永建, 焦克勤, 等. 我国寒区径流对气候变暖的响应. 第四纪研究, 2012, 32(1): 103-110.

15 Chen R, Wang G, Yang Y, et al. Effects of cryospheric change on alpine hydrology: Combining a model with observations

in the upper reaches of the Hei River, China. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2018, 123: 3414-3442.

16 丁永建, 效存德. 冰冻圈变化及其影响. 北京: 科学出版社, 2019.

17 陈仁升, 张世强, 阳勇, 等. 冰冻圈变化对中国西部寒区径流的影响. 北京: 科学出版社, 2019.

18 Zhang S Q, Gao X, Zhang X W. Glacial runoff likely reached peak in the mountainous areas of the Shiyang River Basin, China. Journal of Mountain Science, 2015, 12: 382-395.

19 Zhang Z, Deng S, Zhao Q, et al. Projected glacier meltwater and river run-off changes in the upper reach of the Shule River Basin, north-eastern edge of the Tibetan Plateau. Hydrological Processes, 2019, 33(7): 1059-1074.

20 Zhao Q, Ding Y, Wang J, et al. Projecting climate change impacts on hydrological processes on the Tibetan Plateau with model calibration against the glacier inventory data and observed streamflow. Journal of Hydrology, 2019, 573: 60-81.

21 张廷军, 车涛. 北半球积雪及其变化. 北京: 科学出版社, 2019.

22 Niu L, Ye B S, Li J, et al. Effect of permafrost degradation on hydrological processes in typical basins with various permafrost coverage in Western China. Science China Earth Sciences, 2011, 54(4): 615-624.

23 Kalyuzhnyi I L, Lavrov S A. Basic physical processes and regularities of winter and spring river runoff formation under climate warming conditions. Russian Meteorology and Hydrology, 2012, 37(1): 47-56.

Cryospheric Hydrology: Decode the Largest Freshwater Reservoir on Earth

DING Yongjian[1,2,3*] ZHANG Shiqiang[4,5] CHEN Rensheng[2]

(1 State Key Laboratory of Cryospheric Science, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

2 Key Laboratory of Ecohydrology of Inland River Basin, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

3 University of Chinese Academy Sciences, Beijing 100049, China;

4 Shaanxi Key Laboratory of Earth Surface System and Environmental Carrying Capacity, Northwest University, Xi'an 710127, China;

5 College of Urban and Environmental Sciences, Northwest University, Xi'an 710127, China)

Abstract The cryosphere is solid reservoir, and the meltwater of cryosphere affects hydrology, water resource, and water cycles in the watershed, regional, even global scale. The article reviewed on the current research results on the hydrological function, hydrological processes of meltwater and runoff and their effect, the impact on ecosystem and environment of cryosphere from hydrology view. The hydrological function mainly includes the water conservation, runoff supply, and regulation on water resource. The hydrological processes have significantly changed under the background of climate change, the onset of glacier melting period starts earlier and the volume of melting water has increased, and the snow melting period starts earlier, the permafrost degradation has led to winter runoff increasing, which increases the regulation function of watershed runoff. The projected glacier meltwater will continuingly decrease under the future climate change, which will bring greater challenge on the water resource management of Northwest China. The changes in hydrological process of cryosphere also have important impact on the ecosystem and ecological engineering, flood

* Corresponding author

hazard and sustainability, and geopolitics in cold regions.

Keywords cryosphere, cryospheric hydrology, hydrological function, change, impact



丁永建 中国科学院西北生态环境资源研究院研究员、博士生导师。主要从事寒区水文与水资源、寒旱区环境与全球变化研究。在冰冻圈水文研究方面开拓和发展了学科研究领域和理论，从寒区水文观测到模拟构建了学科研究的方法体系。在开拓冰冻圈变化影响研究方面作出了贡献，提出冰冻圈科学学科框架体系，拓展了冰冻圈科学的内涵。主持中国科学院知识创新工程重大项目、“973”项目和国家重大研究计划项目（A类）各1项，主持国家自然科学基金重点项目3项。发表相关学术论文300多篇，主编《寒区水文导论》《冰冻圈水文学》等专著12部。E-mail: dyj@lzb.ac.cn

DING Yongjian Professor and Ph.D. Supervisor of Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences(CAS). His research interests focus on the hydrology and water resource in cold regions, environment and climate change in cold and arid regions. He has established and developed research field of cryospheric hydrology, and integrated the research methods from field hydrological observation to simulation in cold regions. He has made contributions to the basic research on the impact of cryospheric changes, and put forward the framework of cryospheric science, and expanded the connotation of cryospheric science. He has coordinated multiple research projects including one major project of Knowledge Innovation Engineering of CAS, one “973” project, and one project of National Major Research Plan (Category A), and three key projects of National Natural Science Foundation of China. He has published more than 300 research papers and 12 books including *Introduction on Hydrology in Clod Regions* and *Cryospheric Hydrology*. E-mail: dyj@lzb.ac.cn

■责任编辑：张勇